
Métamatériaux hydrodynamiques : contrôle métrique et dissipatif dans des milieux spatio-temporels variables

Angélique Campaniello^{*1}, Baptiste Pairault^{*}, Quentin Louis¹, Eugénie Bontemps¹, and Emmanuel Fort¹

¹Langevin Institute – ESPCI Paris, PSL Research University – France

Résumé

Les milieux variables en temps constituent un nouveau degré de liberté majeur pour la physique des ondes, permettant d'accéder à des mécanismes inaccessibles aux matériaux statiques : conversion de fréquence, amplification paramétrique ou miroirs temporels instantanés (1,2). Leur mise en œuvre expérimentale reste toutefois limitée par la difficulté de moduler fortement et proprement les paramètres du milieu.

Les ondes hydrodynamiques offrent une plateforme macroscopique idéale pour explorer ces effets. En soumettant un bain liquide à une vibration verticale haute fréquence (≈ 100 Hz), nous exploitons la séparation d'échelles temporelles (effet Kapitza) pour renormaliser statiquement la force de rappel gravitaire ressentie par des ondes lentes (≈ 10 Hz). Il en résulte une gravité effective programmable, pouvant dépasser plusieurs fois , qui agit comme une modification contrôlée de la métrique du milieu.

Cette approche permet de sculpter la relation de dispersion et la dissipation. Des gradients spatiaux d'excitation modifient localement le seuil de Faraday et donc les pertes effectives, autorisant la sélection à la demande des modes propres d'une cavité, la réalisation d'"arc-en-ciel" spectraux pour un même mode, ou encore des transitions contrôlées entre modes de galerie et modes centrés de type Bessel.

Au-delà du contrôle purement statique, nous introduisons un paysage spatio-temporel dynamique en excitant simultanément le bain dans le régime de Faraday à basse fréquence. Les ondes longues générées modulent localement l'accélération effective et créent un milieu effectif dépendant de l'espace et du temps pour des ondes plus rapides.

Deux régimes complémentaires émergent : sous excitation haute fréquence maintenue, la fréquence des ondes rapides est imposée tandis que leur longueur d'onde s'adapte spatialement à fréquence fixée ; après extinction de l'excitation rapide, le nombre d'onde reste fixé tandis que la fréquence évolue temporellement, avec une dynamique spatialement dépendante.

Nous démontrons ainsi un contrôle hiérarchique multi-échelles où une dynamique lente sculpte en temps réel la dispersion et la dissipation d'ondes plus rapides. Les fluides vibrés apparaissent comme un système modèle pour l'ingénierie métrique et dissipative des ondes dans

^{*}Intervenant

des milieux variables en temps.

Références:

- (1) V. Bacot, M. Labousse, A. Eddi, M. Fink & E. Fort, /Nature Phys./ *12*, 972 (2016).
- (2) B. Apffel & E. Fort, /Phys. Rev. Lett./ *128*, 064501 (2022).
- (3) B. Apffel, F. Novkoski, A. Eddi, & E. Fort, /Nature/ *585*, 48-52 (2020).